

Un examen de las relaciones publicadas entre la velocidad y la intensidad en carreteras de dos carriles: exigencias de un modelo integrador

Manuel G. Romana García

Profesor Titular de Universidad, Departamento Ingeniería Civil: Transportes, U.P.M.,
España

Miguel Núñez Fernández

Jefe Servicio de Planificación, D. G. Carreteras, Comunidad de Madrid, España

RESUMEN

La comunicación se centra en examinar las diferentes formas propuestas para la relación entre la velocidad y la intensidad en carreteras de dos carriles. Se han propuesto formas rectas, cóncavas, convexas y cóncavo-convexas. Los investigadores no han formulado ningún intento de explicar las diferencias.

Parece que la forma puede depender de las posibilidades de adelantamiento, y la relación entre velocidades de vehículos lentos y rápidos. Se comienza por revisar las formas publicadas, y se resumen las diferencias principales. Se examinan las diferentes posibilidades, y se formulan las exigencias que debe cumplir un modelo que satisfaga las distintas observaciones realizadas.

Se concluye que los factores que más importan son las posibilidades de adelantamiento, la longitud del tramo de carretera y las diferencias de velocidades entre vehículos lentos y rápidos.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos 75 años se han establecido diferentes modelos que pretenden explicar la relación existente entre las variables fundamentales de circulación intensidad-velocidad-densidad, estas relaciones se representan mediante formas cóncavas, convexas y rectas. Algunas de ellas se han planteado mediante modelos matemáticos mientras que otros están basados en observaciones empíricas.

Algunos de estos modelos están formados con una única relación mientras que otros están compuestos por varias relaciones, principalmente, en función de la intensidad. Varios modelos han sido utilizados y tomados como referencia en diferentes estudios posteriores durante años.

2. ESTUDIOS ANTERIORES

El primer estudio que se realizó en carreteras convencionales sobre esta materia fue el modelo planteado por Greenshields, donde la forma de la relación intensidad-velocidad obedecía a una parábola que contempla la densidad de congestión en 2.200 veh/h, para una velocidad de circulación de 35 km/h; esta relación la cual fue tomada como válida durante décadas.

En 1950 se publicó el primer Manual de Capacidad de Carreteras, HCM50, por Bureau of Public Roads de EEUU como guía para el proyecto y análisis operacional de las infraestructuras de carreteras. El HCM50 representó la relación entre la intensidad y la velocidad media de recorrido dependiendo de la velocidad de partida en condiciones ideales, siendo una curva parabólica, similar a la planteada por Greenshields, para una velocidad de 50 m/h, ligeramente convexa para una velocidad de 60 m/h y con curvaturas diferentes para una velocidad de 70 m/h.

Greenberg postuló en 1959 una ley donde establecía una relación logarítmica entre la velocidad y la intensidad de tráfico análoga a la que ocurría con la dinámica de fluidos, con una representación muy similar a la de Greenshields de 1935 y a la de Huber de 1957. La forma de la relación propuesta obedece a una parábola no simétrica, con un máximo que sucede cuando la velocidad de circulación se corresponde con el parámetro c , característico de la carretera. La forma de la curva planteada por Greenberg y que relaciona estas características de la circulación ha variado poco en los últimos 50 años, de hecho en la última edición publicada por el Manual de Capacidad, HCM2000, la forma propuesta para esta relación es muy similar a la planteada por este autor.

En 1965 se publicó la segunda edición del Manual de Capacidad, HCM65, por Highway Research Board dirigido por el Comité de Capacidad de Carreteras de EEUU, este representa la relación entre la velocidad de circulación y la intensidad total en carreteras de dos carriles, en ambos sentidos, mediante una curva variable dependiendo de la máxima velocidad de circulación permitida de partida. Con intensidades bajas estas formas varían, a medida que aumenta la intensidad. Por otro lado, y según se incrementa la intensidad las curvas adquieren una forma cóncava, salvo las curvas que se representan con unas condiciones de velocidad de 35 millas/h y 45 millas/h. El HCM65 representa estas curvas no solo en condiciones ideales sino también en otros supuestos reales, y en ellas se puede comprobar la variabilidad de las curvaturas para una misma velocidad ideal de partida, en función de lo que se alejen de las condiciones ideales.

La tercera edición del Manual de Capacidad de Carreteras publicada en 1985, HCM85, y con actualizaciones en 1992 y 1994, dirigido por el Comité de Capacidad de Carreteras y Calidad de Servicio del Transportation Research Board de EEUU introduce importantes cambios en lo relativo a carreteras convencionales, modificando la metodología, la capacidad máxima, la velocidad de recorrido y la determinación de los niveles de servicio. El HCM85 representa la relación mediante una relación cóncava de un único tramo en condiciones ideales.

Botma realizó en 1986 un estudio en carreteras convencionales de Holanda para comprobar que la determinación de los niveles de servicio de estas carreteras no dependía únicamente de la velocidad, tal y como se introducía en la tercera edición del Manual de Capacidad de 1985, dando un mayor protagonismo a la libertad de maniobras, la posibilidad de realizar

adelantamientos, tiempo demorado, la longitud del tramo característico, influencia de vehículos líderes, etc. Se comprobaron grandes analogías entre ambos en este sentido. Por otro lado, los valores obtenidos en esta relación distaba en un intervalo entre 5 a 10 km/h por encima con respecto a la establecida en el HCM85 para las carreteras norteamericanas.

De igual modo, Galán realizó en 1990 una campaña sobre las principales carreteras de dos carriles de la Red de Carreteras del Estado en España para comprobar las modificaciones que se introducían con respecto a la edición anterior, HCM65, y establecer la relación velocidad-intensidad en estas carreteras de acuerdo al nuevo modelo. A raíz de lo anterior Galán publicó unas curvas de la relación i/c -velocidad de recorrido mediante una función parabólica para los valores más bajos, $i/c < 0,2$, y para el resto, $i/c > 0,2$, una función lineal que dieran a conocer en cualquier carretera, definida por su velocidad específica, la velocidad de recorrido de los vehículos ligeros en función del tráfico.

Hoban et al. (1994) propusieron un modelo teórico de tres zonas para determinar la relación intensidad velocidad, que fue empleado por el Banco Mundial como programa de análisis económico de carreteras: Highway Design and Maintenance model, HDM-4. El modelo de Hoban et al. no emplea el concepto de vehículos ligeros equivalentes, sino el espacio ocupado por cada vehículo. En la relación de Hoban et al. se proponen tres zonas, todas representadas con relaciones lineales; la circulación libre se representa con una recta a velocidad constante, donde la intensidad de los vehículos no provoca interacciones importantes entre vehículos que hagan reducir la velocidad de éstos, esta relación velocidad-intensidad es decreciente con el aumento de la intensidad hasta la capacidad, donde todas las relaciones convergen, independientemente de la velocidad inicial característica del tramo de carretera.

Van Aerde realizó en 1995 un estudio que ajustaba el modelo de Greenshields mediante un modelo de cuatro parámetros con autocalibraciones con datos reales que se obtienen en diferentes tramos de carreteras mediante aforos y coche-siguiendo. Este método lleva implícito establecer a priori ciertas hipótesis, como la forma de la curva, donde se considera una parábola distorsionada en la que el valor de la velocidad, en capacidad máxima, varía en torno al 50% con respecto a la velocidad libre, así como las relaciones en las variables fundamentales de evaluación del tráfico (densidad, intensidad, velocidad en capacidad, velocidad libre y otras) pero no presuponen una dependencia entre ellas.

La cuarta edición del Manual de Capacidad (2000), publicado por National Research Council de EEUU plantea que las relaciones intensidad-velocidad son rectas de pendiente constante, igual a -0.00125 km/h por cada vehículo que viaja por la carretera, en uno u otro sentido.

En el año 2001 se publicó el Manual de Capacidad Alemán, HBS. En este Manual se determinó la relación intensidad-velocidad mediante valores empíricos. La medida de la efectividad en estas carreteras difiere ligeramente de la empleada por el HCM2000 donde el

porcentaje de demora en tiempo es el valor determinante del nivel de servicio, pero en el HBS hay otros conceptos que priman sobre él: la seguridad de la circulación, la comodidad y la conciliación del trazado de la carretera con el medio ambiente. La velocidad legal de circulación en Alemania suele ser de 100 km/h y se ha comprobado que ésta velocidad se supera entre un 10 y 20%. Las curvas que se obtienen en el HBS tienen unas formas cóncavas que se alejan del modelo lineal planteado en el HCM2000, motivado principalmente por la diferencia entre velocidades de los vehículos pesados y ligeros, así como la influencia de la pendiente y la curvatura en el comportamiento del tráfico. La figura siguiente muestra, en condiciones ideales, la relación velocidad-intensidad propuesta en el HBS y en el HCM2000,

Luttinen, R.T., Dixon, M. y Washburn, S. y Luttinen, R.T. comprobaron en 2001 que la relación lineal propuesta en el HCM2000 se aleja de la realidad, proponiendo como alternativa diferentes modelos propuestos por otros autores donde la relación velocidad-intensidad tiene una curvatura cóncava. Otra alternativa propuesta por Luttinen es el modelo de Erlander, el cual tiene una forma cóncava con un efecto lineal del tráfico en sentido contrario.

Romana propuso en 2005 un modelo teórico donde la relación de la curva velocidad-intensidad estaba planteada por tres regiones derivadas de la combinación de observaciones reales con consideraciones teóricas.

Modelos con curvatura convexa	Greenshields (1935); HCM50 (1950) velocidad libre de 50 m/h; HCM65 (1965) velocidades libres 40, 45, 50, 60 m/h; Van Aerde (1995); Erlingsson (2006)
Modelos con curvatura cóncava	Greenberg (1959); Edie (1961); HCM85 (1985); Botma (1985); Brilon y Weiser (1998); Manual de Capacidad Alemán (2001); Romana (2005); Luttinen, et al. (2005)
Modelos con curvatura cóncava-convexa	HCM50 (1950) velocidades libres de 60, 70 m/h; HCM65 (1965) velocidad libre 35 m/h
Modelos con curvatura convexa-cóncava	HCM65 (1965) velocidad libre de 70 m/h
Modelos con relaciones lineales	Galán (1990); Hoban (1994); Pipes (2002); HCM2000 (2000)

Tabla 1 – Forma de la relación intensidad-velocidad planteada según diferentes autores

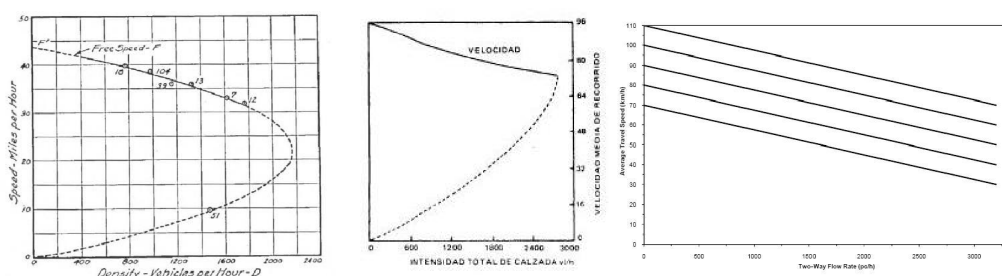


Figura 1a a 1c – Modelo convexo de Greenshields (1935), cóncavo del HCM85 (1985) y lineal del HCM2000 (2000), respectivamente.

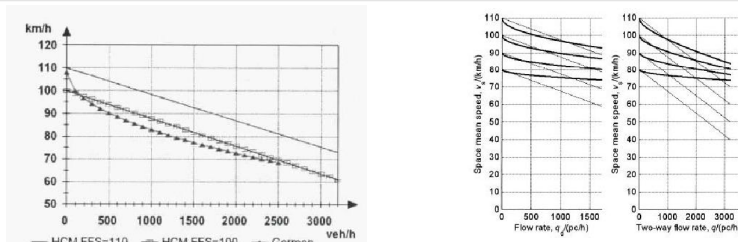


Figura 2a a 2c - Comparación leyes velocidad-intensidad propuestas en HBS y HCM2000 y comparación del modelo cóncavo de Luttinen con las relaciones del HCM2000.

3. CONCLUSIONES DE LAS RELACIONES PLANTEADAS EN ESTUDIOS ANTERIORES

La tendencia de la relación planteada en las carreteras con buena geometría, y por tanto con una velocidad de planteamiento inicial relativamente alta, es una relación velocidad-intensidad con forma generalmente cóncava, sin embargo, aquellas carreteras con velocidad de partida inferior tienden a tener una curvatura convexa, debido a que en carreteras con buena geometría la dispersión de velocidades para intensidades bajas es mayor. Por otro lado, la pendiente de la curva está relacionada con la posibilidad de poder realizar adelantamientos con éxito y como consecuencia de ello, la reducción de velocidad es más rápida con un incremento de la intensidad ya que a medida que ésta aumenta también lo hace la proporción de vehículos lentos que retrasan a los rápidos.

Cuando la geometría en planta empeora, los vehículos rápidos no pueden serlo todo lo que desean provocando menos dispersión en la corriente de tráfico siendo la distancia entre vehículos más homogénea y menor, reduciendo con ello las posibilidades de adelantamiento, representándose en los modelos con una pendiente suave en la relación de la curva.

En las curvas propuestas en el HCM50 se comprueba estas particularidades, donde la relación con una velocidad media deseada de partida alta, 70 millas/h, tiene una curvatura cóncava, con un descenso de velocidad bastante pronunciada a medida que se aumenta la intensidad y con ello se reducen las posibilidades de realizar un adelantamiento con éxito, produciéndose un cambio de curvatura cuando la velocidad media de circulación se hace próxima a 60 millas/h adquiriendo, en torno a 800 veh/h una pendiente más suave. Por otro lado, y con una velocidad media deseada de partida de 50 millas el descenso de velocidad con respecto a la inicial en función del incremento de intensidades es relativamente suave, a esta curva convergen las anteriores con una intensidad alta de 1.300 veh/h, ya que con estas intensidades la posibilidad de adelantamiento y recuperar una velocidad deseada alta de circulación es más escasa.

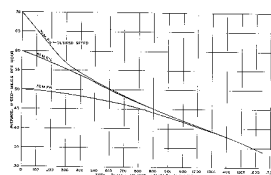


Figura 3 – Modelo planteado en el HCM50 (1950)

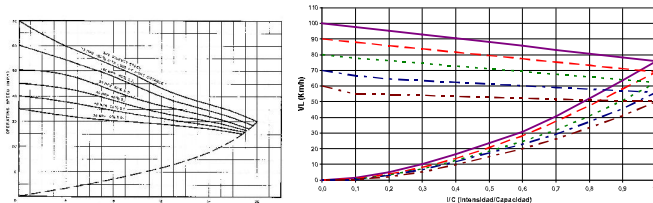
En algunos de los modelos propuestos se plantea un cambio de curvatura lo largo del desarrollo de la curva; sin embargo, hay otros modelos propuestos donde la relación velocidad-intensidad está formada mediante una única curvatura o relación.

	Modelo	Cambio de curvatura	intensidad, velocidad
Modelos con cambio de curvatura	HCM50 (1950); v_m 70 m/h	Cóncavo a convexo	330 veh/h, 57 m/h
		Convexo a convexo	880 veh/h, 46 m/h
		Convexo a convexo	1300 veh/h, 38 m/h
	HCM50 (1950); v_m 60 m/h	Convexo a convexo	1300 veh/h, 38 m/h
	HCM65 (1965); v_m 70 m/h	Cóncavo a lineal	800 veh/h, 47 m/h
	HCM65 (1965); v_m 60 m/h	Convexo a cóncavo	1200 veh/h, 45 m/h
	HCM65 (1965); v_m 50 m/h	Lineal a convexo	400 veh/h, 50 m/h
		Convexo a cóncavo	1050 veh/h, 40 m/h
	HCM65 (1965); v_m 45 m/h	Lineal a convexo	300 veh/h, 45 m/h
		Convexo a lineal	1450 veh/h, 33 m/h
	HCM65 (1965); v_m 40 m/h	Lineal a convexo	200 veh/h, 40 m/h
		Convexo a lineal	1500 veh/h, 30 m/h
	Galán (1990); v_m 70 m/h	Lineal a lineal	$i/c=0,1$, 67 km/h
	Galán (1990); v_m 60 m/h	Lineal a lineal	$i/c=0,1$, 55 km/h
Modelos sin cambios de curvatura	Hoban et al. (1994)	Lineal a lineal	No se establece
	Romana (2005)	Convexo a cóncavo	No se establece
	Greenshields (1935), HCM50 (1950) v_m 50 m/h; Greenberg (1959), Underwood (1961), HCM85 (1985), Galán (1990) v_{libre} 80, 90 y 100 km/h, Van Aerde (1995), Pipes (2002), HCM2000 (2000), Manual de Capacidad Alemán (2001), Luttinen, Dixon y Washburn (2005), Erlingsson (2006)		

Tabla 2 – Cambio de curvatura en los modelos propuestos

En la segunda edición del Manual de Capacidad, HCM65, se establece que cuando la distancia de visibilidad disminuye en porcentaje con respecto a la ideal se reducen las posibilidades de adelantamiento y por tanto las de mantener la velocidad deseada; las curvaturas de la relación velocidad-intensidad se modifican en esta línea. En condiciones ideales, por norma general, las curvaturas son convexas o lineales pero con una concepción global convexa; sin embargo, a medida que se empeoran las condiciones del entorno donde se enmarca la carretera, la curvatura de estas relaciones se diferencian en dos tramos: el primer tramo con influencia cóncava y el segundo con influencia convexa.

El modelo propuesto por Galán (1990) establece una diferencia de curvatura entre tramos prácticamente lineales pero con una concepción global lineal; por otro lado, en el modelo teórico de Hoban et al. (1994) se propone un modelo de tres zonas con relaciones lineales donde la conjunción de las mismas forman una curvatura convexa.



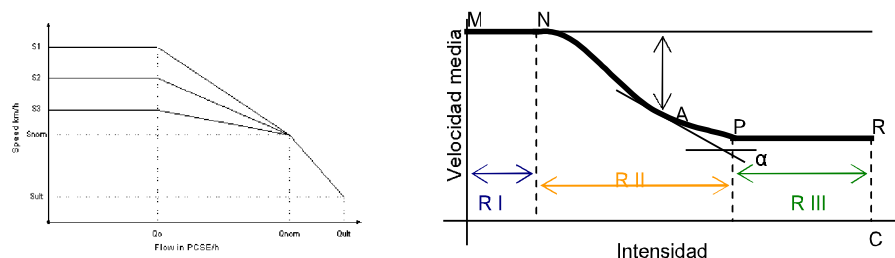
Figuras 4a y 4b – Modelo planteado en el HCM65 (1965) y por Galán (1990)

Las formas de las relaciones planteadas en los diferentes modelos empíricos están estrechamente ligadas a las condiciones en que se desarrollan estas mediciones, así como en las características del tramo estudiado.

A pesar de que la mayoría de los modelos planteados están sustentados con valores experimentales y empíricos, hay diversos métodos teóricos que proponen diversas relaciones, entre ellos los modelos propuestos por Hoban (1994) y Romana (2005).

Modelos experimentales	Greenshields (1935); Greenberg (1959); HCM50 (1950); Edie (1961); HCM65 (1965); HCM85 (1985); Galán (1990); Van Aerde (1995); Brilon y Weiser (1998); HCM2000 (2000); Manual de Capacidad Alemán (2001); Pipes (2002); Luttinen Dixon y Washburn (2005); Erlingsson (2006)
Modelos teóricos	Hoban (1994) y Romana (2005)

Tabla 3 - Clasificación de los modelos según su planteamiento



Figuras 5a y 5b – Modelos teóricos de Hoban et al. (1994) y Romana (2005).

Algunas de las relaciones planteadas en los modelos descritos son menos consistentes que otras. Por un lado, la tercera y cuarta ediciones del Manual de Capacidad, HCM85 y HCM2000, presentan relaciones muy rígidas, y por otro las relaciones de las dos primeras ediciones, HCM50 y HCM65, muestran curvas más reales aunque con valores de velocidades e intensidades de hace más de 50 años. Esta apreciación de la divergencia con la realidad de los modelos de las últimas ediciones con respecto a los primeros se ha constatado en diferentes estudios: McLean (1986) y Hoban (1986) resaltaron que, a pesar de las evoluciones del parque de vehículos y las mejoras en infraestructuras, el nivel de servicio que se obtenía con el método propuesto por el HCM85 era menor que el se obtenía con el método del HCM65; Hoban expresó que era más útil establecer el nivel de servicio con el tiempo siguiendo que con el porcentaje de tiempo perdido, ya que era más intuitivo y fácil de medir, etc. Otras curvas que se ajustan bastante a la realidad de cada tipo de carretera son las planteadas en el Manual de Capacidad Alemán.

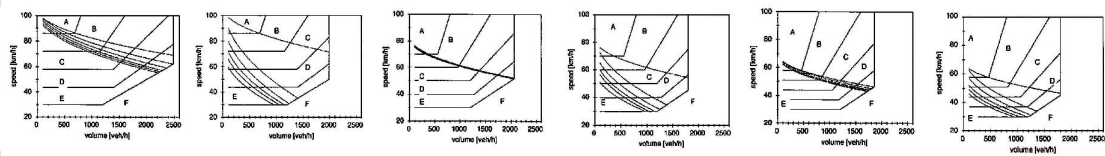


Figura 6 – Modelo planteado en el Manual de Capacidad Alemán (2001)

4. CONCLUSIONES

De los diferentes estudios y análisis de los mismos se pueden extraer las siguientes hipótesis previas para el desarrollo del modelo planteado en esta Tesis doctoral:

- la forma de la curva depende de la velocidad libre. Con una velocidad libre superior de partida la forma de la curvatura de la relación tiende a ser cóncava.
- el porcentaje de vehículos pesados, y debido a ello la velocidad media de circulación, determina la pendiente de las curvas. Cuando el porcentaje de vehículos pesados aumenta en una corriente de tráfico la velocidad media de la circulación desciende rápidamente.
- la cantidad de oportunidades de adelantamiento puede suavizar la curvatura. Con pocas oportunidades de adelantamiento la relación de la velocidad desciende rápidamente.
- la relación velocidad-intensidad propuesta depende de la longitud de tramo analizado. Cuanto mayor sea la longitud del tramo analizado mayores posibilidades de acercamiento entre vehículos y por tanto más colas y demoras.

REFERENCIAS

- BOTMA, H. (1986): *Traffic Operation on Busy Two-Lane Rural Roads in The Netherlands*. Transportation Research Record, n° 1091. TRB, Washington, D.C.
- BUREAU OF PUBLIC ROADS (1950): *Highway Capacity Manual. Practical Applications of Research*. US Department of Commerce, Washington, D.C.
- GERMAN ROAD AND TRANSPORTATION RESEARCH ASSOCIATION (2005). *German Highway Capacity Manual / Handbuch fuer die Bemessung von Strassen*. HBS 2001. Cologne, Germany.
- GREENBERG, H. (1959): *An analysis of traffic flow*. Operations Research, Vol. 7, N° 1.
- GREENSHIELDS, B.D. (1935): *A Study of Traffic Capacity*. Proceeding of Highway Research Board, Vol. 14, pp. 448-477.
- HIGHWAY RESEARCH BOARD (1965): *Special report 87: Highway Capacity Manual*. National Research Council, Washington, D.C.
- ROMANA, M.G. (2005): *Rules to build your own 2-lane highway model for direccional speed-flow relationships*. Paper presented at the TRB meeting in 2005.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000): *Highway Capacity Manual 2000*. TRB, National Research Council, Washington, D.C.(version vigente)
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1985): *Highway Capacity Manual*. Special report 209: Highway Capacity Manual. TRB, National Research Council, Washington, D.C.